

**Kriterien zur Wahl
eines zweckmäßigen Pendelwinkels
bei der Bestrahlung exzentrisch liegender Herde**

Werner Stark

Druck: Anneliese Schubert, München 5, Corneliusstraße 21, Telefon 21777

AUS DEM RÖNTGENINSTITUT

Vorstand: Professor Dr. A. KOHLER

DER CHIRURGISCHEN KLINIK DER UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Direktor: Professor Dr. E. K. FREY

Kriterien zur Wahl
eines zweckmässigen Pendelwinkels
bei der Bestrahlung exzentrisch liegender Herde

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde in der gesamten Medizin
verfasst und einer Hohen Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Werner Stark

aus
Gablonz a.d.N. (Sudetenland)



München 1958

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: Professor Dr. A. KOHLER
Mitberichterstatter: Professor Dr. E.K. FREY
Dekan: Professor Dr. W. BÜNGELER

Tag der mündlichen Prüfung: 26.6.1958



INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
EINLEITUNG	5
EXPERIMENTELLER TEIL	6
Versuchsanordnung	6
Ergebnisse	7
RECHNERISCHER TEIL	10
Berechnung der Raumdosis	10
Berechnung der relativen Herdraumdosis	11
Berechnung der mittleren Dosis im Gesunden	12
Ergebnisse	13
Raumdosen	14
Relative Herdraumdosen	15
Mittlere Dosen im Gesunden	16
Abhängigkeit vom Durchmesser des bestrahlten Körpers	17
AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE	19
Dosisleistung	19
Mittlere Dosis im Gesunden	19
Raumdosis	20
Relative Herdraumdosis	21
ABBILDUNGEN	1-10
	11-14
	15-18
	19-22
	23+24
	25-28
	26-30
	31-34
	35-38
	39-40
	41-42
	43
ZUSAMMENFASSUNG	44
LITERATUR	46
LEBENS LAUF	47

E I N L E I T U N G

Für bestimmte Teilgebiete in der Pendeltherapie haben verschiedene Autoren die erfahrungsgemäss günstigsten Pendelwinkel genannt. Ausserdem sind auf Grund von Berechnungen und Messungen am Phantom verschiedentlich allgemeinere Angaben über die Zweckmässigkeit der zu verwendenden Pendelwinkel gemacht worden. (1,3,5,9)

W. BRANDL hat für Herde, die in einem runden Körper mehr als 5cm unter der Oberfläche liegen, einen möglichst grossen Pendelwinkel, wenn möglich den vollen Winkel von 360° befürwortet. Bei oberflächlicher liegenden Herden hält er entsprechend kleinere Pendelwinkel für günstiger. (2)

Die Aufgabe der vorliegenden Arbeit ist es, auf experimentellem und rechnerischem Wege für die Bestrahlung von Herden in runden Körpern einen günstigen Pendelwinkel zu finden. Es wurden Körper mit verschieden grossen Durchmessern gewählt, in denen die zu bestrahlenden Herde verschieden tief bzw. in verschieden grosser Entfernung von der Mittelachse des Körpers lagen. Als Kriterien der Zweckmässigkeit der Bestrahlungsbedingungen sollen die Änderung des Dosiszuflusses in der Pendelachse, die Raumdosis, die relative Herdraumdosis und die mittlere Dosis im Gesunden betrachtet werden. Die Ergebnisse der Messungen und Berechnungen stellen allerdings insofern immer einen Idealfall dar, als sie sich ausnahmslos auf ein Phantom homogener Absorption beziehen.

E X P E R I M E N T E L L E R T E I L

Die Versuche wurden im Röntgeninstitut bei der Chirurgischen Klinik der Universität München durchgeführt.

Versuchsanordnung:

Verwendet wurden zwei kreisrunde, homogene Paraffinphantome, die in der Mitte und in verschiedenen exzentrischen Lagen, d.h. in verschiedenen Entfernungen von ihrer Mittelachse, Bohrlöcher besaßen, in welche die Messkammer eingeführt werden konnte.

Die Durchmesser der Phantome waren 24 cm und 18 cm, ihre Höhe 16 cm.

Das verwendete Bestrahlungsgerät ist das nach Prof. KOHLER von den Siemens-Reiniger-Werken gebaute Pendelgerät. (Beschreibung S 80 B : 371 II a der Siemens-Reiniger-Werke Erlangen)

Die Messungen erfolgten über eine in ihrer Empfindlichkeit passende Messkammer mit einem Zeiger-Duplex-Dosimeter der Physikalisch-Technischen Werkstätten GmbH, in Freiburg i.Br.. An das Gerät war ein Linienschreiber in raumsparendem Gehäuse der Firma Metrawatt, Nürnberg, angeschlossen. Die Eichung des Messgerätes erfolgte durch eine Vergleichsmessung mit der bekannten Röhrenleistung frei Luft in 50 cm Fokus-Kammer-Abstand.

Es wurden folgende Messungen durchgeführt:

Bei einem Phantomdurchmesser von	18 cm	24 cm
und einer		
Exzentrizität des Herdes von	2 cm	2 cm (Abb. 1 und 2)
	4 cm	4 cm (Abb. 3 und 4)
	6 cm	6 cm (Abb. 5 und 6)
	8 cm	8 cm (Abb. 7 und 8)
	10 cm	10 cm (Abb. 9 und 10)

Der Pendelwinkel hatte bei allen Messungen eine Grösse von 200° . Die Hautfeldhöhe betrug immer 10 cm, weil mit dieser die Messkammer sicher erfasst wird und sich bei späteren Berechnungen einfache und übersichtliche Werte ergaben.

Die Hautfeldbreite war 5, 4 und 3 cm. In den Abbildungen 1-10 gilt die obere Kurve für die Hautfeldbreite von 5, die mittlere für eine von 4, die untere für eine von 3 cm.

Der Fokus-Hautabstand wurde den Gepflogenheiten des hiesigen Instituts zufolge mit 50 cm in der Position der Röhre über dem kürzesten Fahrstrahl gewählt.

Die Pendeltiefe war etwas grösser als die tatsächliche Tiefe des Herdes, weil besonders bei kleinem Winkel und grossem Hautfeld das Dosismaximum nicht in der Pendelachse liegt, sondern zur Körperoberfläche auswandert. (6,8) Die bei den Versuchen gewählte Differenz zwischen Pendeltiefe und Herdtiefe entspricht etwa der Hälfte der Feldbreite. Der Abstand zwischen Dosismaximum und Pendelachse ist also umso kleiner, je schmaler das Feld und je kleiner der Durchmesser des bestrahlten Herdes ist.

Die Strahlenqualität bei der Pendelbestrahlung ist, wenn sie oberhalb 0,6 mm Cu HWS liegt, ohne wesentlichen Einfluss auf die Tiefendosen. (1,10,11) Sie betrug bei den beschriebenen Versuchen um 1,0 mm Cu HWS bei einer Spannung von 180 kV und einer Vorfilterung von 0,5 mm Cu.

Ergebnisse:

Die Abbildungen 1-10 zeigen den Dosiszufluss am Herd in Abhängigkeit von der Winkelstellung des Zentralstrahls zum kürzesten Fahrstrahl.

Abbildung 1

Körperdurchmesser = 18 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes an einem um 2 cm exzentrisch liegenden Herd.

Abbildung 2

Körperdurchmesser = 24 cm

Abbildung 3

Körperdurchmesser = 18 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes an einem um 4 cm exzentrisch liegenden Herd.

Abbildung 4

Körperdurchmesser = 24 cm

Abbildung 5

Körperdurchmesser = 18 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes an einem um 6 cm exzentrisch liegenden Herd.

Abbildung 6

Körperdurchmesser = 24 cm

Abbildung 7

Körperdurchmesser = 18 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes an einem um 8 cm exzentrisch liegenden Herd.

Abbildung 8

Körperdurchmesser = 24 cm

Abbildung 9

Körperdurchmesser = 18 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes bei zentralem Herd

Abbildung 10

Körperdurchmesser = 24 cm

Dosiszufluss in Prozent des Röntgenwertes bei einem um 10 cm exzentrisch liegenden Herd.

Der Einfachheit halber wurde der Röntgenwert der Röhre (Dosisleistung bei 50 cm Fokus-Kammerabstand frei Luft) mit 100 relativen Einheiten angenommen. Die angegebenen Zahlen in den Abbildungen 1-10 entsprechen der jeweiligen Dosisleistung in Prozenten des Röntgenwertes. Dieser betrug bei der zu den Versuchen verwendeten Röhre unter den gegebenen Bestrahlungsbedingungen 37,5 r/min. Um aus den Werten der Kurven die gemessenen Dosisleistungen zu erhalten, sind diese Werte mit dem Faktor

$$37,5 : 100 = 0,375$$

zu multiplizieren.

Bei Abbildung 9 erwartet man eine konstante Dosisleistung, da sich die Messkammer im Zentrum des kreisrunden Körpers befindet. Dass die Dosisleistung bei kleineren Winkelstellungen etwas höher ist als bei

grösseren, ist dadurch bedingt, dass die Messkammer wegen der beschriebenen Auswanderung des Dosismaximums von der Pendelachse zwar in die Körperachse, aber nicht in die Pendelachse zu liegen kam.

R E C H N E R I S C H E R T E I L

Die Zweckmässigkeit des zu verwendenden Pendelwinkels ergibt sich nicht nur aus der bei verschiedenen Winkelstellungen gemessenen Dosisleistung, sondern auch aus dem Vergleich der Raumdosen, der relativen Herdraumdosen und der mittleren Dosen im Gesunden. Diese wurden hier für einige Fälle berechnet.

Alle im folgenden angegebenen Werte für Raumdosen, relative Herdraumdosen und mittlere Dosen im Gesunden beziehen sich auf eine wasseräquivalent absorbierende und streuende Substanz, weil es in der Tiefentherapie üblich ist, die Absorption im Körper als wasseräquivalent anzusehen und weil die für die folgende Berechnung verwendeten Tabellen und Formeln sich ausnahmslos auf wasseräquivalente Substanzen beziehen.

Erklärung der verwendeten Abkürzungen:

RD	=	Raumdosis;	Dimension : rl (Röntgenliter)
R _w	=	Röntgenwert d. Röhre;	Dimension : (r/min)
F	=	Feldgrösse;	Dimension: cm ² in 50cm FHA
t	=	Bestrahlungszeit;	Dimension : min
f _r	=	Faktor r;	Dimension : (cm)
D _{pa}	=	Dosis in der Pendelachse (in r)	
I	=	Faktor I (Intensitäts-oder Tiefenfaktor)	
MDL	=	mittlere Dosisleistung (in r/min)	
DL	=	Dosisleistung (r/min)	
HRD	=	Herdraumdosis (rl)	
HR	=	Herdraum (l)	
FHA	=	Fokus-Haut-Abstand (cm)	

Die Berechnung der Raumdosis erfolgt nach der Formel (7) :

$$RD = R_w \cdot t \cdot F \cdot f_r$$

oder in Worten:

Die Raumdosis ist gleich dem Produkt aus dem Röntgenwert der Röhre, der Bestrahlungszeit in Minuten, der Feldgrösse in cm^2 bei 50 cm FHA und dem Faktor r.

Man erhält die Raumdosis in Röntgenlitern (rl).

Es ist ausserdem bekannt, dass

$$D_{pa} = R_w \cdot t \cdot I \quad \text{ist.}$$

Da bei den folgenden Berechnungen die D_{pa} 1000 r gross gewählt wird, ergibt sich: $1000 \text{ r} = R_w \cdot t \cdot I$

dann ist
$$t = \frac{1000 \text{ r}}{R_w \cdot I}$$

In die Formel der Raumdosis eingesetzt:

$$\begin{aligned} RD &= R_w \cdot F \cdot \frac{1000 \text{ r}}{R_w \cdot I} \cdot f_r \\ &= F \cdot \frac{1000 \text{ r}}{I} \cdot f_r \\ &= 1000 \text{ r} \cdot \frac{f \cdot f_r}{I} \end{aligned}$$

oder in Worten:

Die Raumdosis erhält man, wenn man das Produkt aus 1000 r, der Feldgrösse in cm^2 und dem Faktor r durch den I-Faktor dividiert.

Um eine möglichst klare Übersicht über die Grössen der Raumdosen in jedem Bereich des Pendelwinkels zu erhalten, wurde die Raumdosis nicht für den ganzen Pendelwinkel, sondern für Abschnitte von je 20° gesondert errechnet und dargestellt. Aus diesem Grunde war es notwendig, die

I-Faktoren für jeden dieser Abschnitte einzeln zu ermitteln. Dazu wurde für jeden Abschnitt des Pendelwinkels von je 20° der längste und der kürzeste Fahrstrahl an einer Zeichnung in natürlicher Grösse gemessen und aus diesen als arithmetisches Mittel der mittlere Fahrstrahl errechnet.

Die den Längen der mittleren Fahrstrahlen zugehörigen Intensitätsfaktoren wurden dann aus entsprechenden Tabellen abgelesen. (4)

Beispiel zur Berechnung der Raumdosis:

Wie gross wird die Raumdosis bei einem homogenen wasseräquivalenten Körper mit 18 cm Durchmesser und 20 cm Höhe, wenn die Pendelachse in der Mittelachse des zylindrischen Phantoms liegt und in der Pendelachse eine Dosis von 1000 r erreicht werden soll? (Strahlenqualität etwa 1,0 mm Cu HWS). Das verwendete Hautfeld ist bei 50 cm FHA 5 cm • 10 cm gross.

$$RD = \frac{1000 \cdot F \cdot f_r}{I} ; \quad F = 50; f_r \text{ bei einer Schichtdicke von } 18 \text{ cm} = 0,0142; \\ I \text{ bei einem mittleren Fahrstrahl (hier für jeden Winkel, da der Fahrstrahl nicht variiert) von } 9 \text{ cm} = 0,38$$

$$RD = \frac{50 \cdot 0,0142 \cdot 1000}{0,38} = 1865 \text{ rl}$$

Die relative Herdraumdosis wird wie folgt berechnet:

$$\text{rel. HRD} = \frac{\text{Dosis im Herd} \cdot \text{HR} \cdot 100}{RD}$$

in Worten:

Die relative Herdraumdosis erhält man, wenn man das hundertfache Produkt aus der Dosis im Herd und dem Herdraum durch die Raumdosis dividiert; (da die relative Herdraumdosis in Prozent ausgedrückt wird, musste der Zähler des Bruches mit 100 multipliziert werden).

Die mittlere Dosis im Gesunden findet man, wenn man die Raumdosis im Gesunden (das ist die Raumdosis, von der die Herdraumdosis abgezogen wurde) durch den gesamten, ausserhalb des Herdes liegenden durchstrahlten Raum dividiert.

$$\text{mittl. Dosis im Gesunden} = \frac{\text{Raumdosis} - \text{Herdraumdosis}}{\text{durchstrahlter Raum} - \text{Herdraum}}$$

Der durchstrahlte Raum wächst mit der Grösse des Pendelwinkels.

Er wurde wie folgt ermittelt:

Zuerst zeichnete man den kreisförmigen Querschnitt des jeweils angenommenen zylindrischen Phantoms in natürlicher Grösse auf. In diese Kreisfläche wurde dann das Feld eingezeichnet, das den Querschnitt durch den Raumanteil des Zylinders darstellte, der bei einem bestimmten Pendelwinkel von dem einfallenden Strahlenbündel durchzogen wird. Diese Zeichnung wurde zuerst durchgeführt bei Annahme eines Stehfeldes bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls; dann folgten die Darstellungen für Pendelwinkel von 20, 40, 60° usw., immer um 20° zunehmend, bis zum Winkel von 360°.

Die so erhaltenen Flächen, die also dem Querschnitt des bestrahlten Raumes bei einem bestimmten Pendelwinkel entsprechen, wurden in ihrer Grösse planimetrisch bzw. planigraphisch bestimmt.

Da als Höhe des durchstrahlten Raumes in den verwendeten Zylindern die Höhe des Hautfeldes (hier immer 10 cm bei 50 cm FHA) angenommen wurde, brauchte man nur die eben ermittelten Flächen mit dieser Höhe zu multiplizieren, um den durchstrahlten Raum für den betreffenden Pendelwinkel zu erhalten.

Der kegelförmige Raumteil, der sich durch die Divergenz des eintretenden Strahlenbündels in seiner Höhe ergibt, sowie die aus der seitlichen Divergenz und durch das Auftreten von Halbschatten resultierenden Abweichungen sind hier nicht berücksichtigt; ebenso wurde die durch den nicht konstanten Fokus-Haut-Abstand bedingte Veränderung der Hautfeldgrösse ausser acht gelassen. Die daraus folgende Ungenauigkeit von etwa 5% hat auf die Ergebnisse der Arbeit keinen wesentlichen Einfluss und kann daher vernachlässigt werden.

Ergebnisse :

Die Abbildungen 11-22 zeigen die Raumdosen, relativen Herdraumdosen und mittleren Dosen im Gesunden für jeden Pendelwinkel, bzw. für Abschnitte des Pendelwinkels von je 20° , wenn in der Pendelachse eine Dosis von 1000 r erreicht wird.

Für die Berechnung wurden vier kreisrunde Körper mit Durchmessern von 15, 18, 21 und 24 cm angenommen. Die Höhe der zylindrischen Körper betrug 12 cm. Ihre Absorptions- und Streuungsverhältnisse sollen denen von Wasser entsprechen.

In diesen Körpern wurden in verschiedenen Lagen die zu bestrahlenden Herde angenommen, und zwar ist bei einem Körperdurchmesser von

	15	18	21	24 cm
die Entfernung dieser				
Herde von der Mittelachse	0	0	0	0 cm
	2	2	2	2 cm
	4	4	4	4 cm
	6	6	6	6 cm
		8	8	8 cm
				10 cm

Die entsprechenden Diagramme sind zu finden in den Abbildungen Nr.

11	12	13	14 (Raumdosen)
15	16	17	18 (relat. Herdraumdosen)
19	20	21	22 (mittlere Dosen im Gesunden)

Die angenommenen Herde liegen also in der Mittelachse, ferner um 2, 4, 6, 8 und 10 cm exzentrisch. Der Herd selbst ist ein zylindrischer Körper von 10 cm Höhe und 3 cm Durchmesser. Sein Volumen ist ca. 70ccm.

Die Pendelachse soll in der Mittelachse des Herdes liegen. Das Hautfeld hat eine Ausdehnung von 3 cm x 10 cm. Sie wird bezogen auf einen Fokus-Haut-Abstand von 50 cm bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls.

Die der Berechnung zugrunde liegende Strahlenqualität ist ca. 1,0 mm CU HWS.

Raumdosen: Die Abbildungen 11-14 zeigen die Raumdosen in Abhängigkeit vom Pendelwinkel, wenn in der Pendelachse eine Dosis von 1000 r erreicht wird.

Um die Grösse der Raumdosis in jedem Bereich des Pendelwinkels übersichtlich zeigen zu können, wurde sie für jeden Pendelwinkelabschnitt von 20° gesondert angegeben. Eine Darstellung, die sich auf den ganzen Pendelwinkel bezieht, würde immer nur Summierungswerte zeigen und damit die Zunahme der Raumdosis in den verschiedenen Bereichen des Pendelwinkels erheblich verschleiern.

Abbildung 11

Raumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 15 cm Durchmesser.

Abbildung 12

Raumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 18 cm Durchmesser.

Abbildung 13

Raumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 21 cm Durchmesser.

Abbildung 14

Raumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 24 cm Durchmesser.

Die angegebenen Werte beziehen sich nicht auf den ganzen Pendelwinkel, sondern immer nur auf Winkelabschnitte von je 20° . Den Wert der Raumdosis für den fortlaufenden Pendelwinkel würde man erhalten, wenn man die Werte der einzelnen Abschnitte addiert und die Summe durch die Anzahl der im ganzen Pendelwinkel enthaltenen Abschnitte von je 20° dividiert. Das Gleiche gilt für die Abbildungen 15-18.

Relative Herdraumdosis: Die Abbildungen 15-18 zeigen die relative Herdraumdosis, errechnet aus den Raumdosen, die aus den Abbildungen 11-14 bekannt sind. Der angenommene Herdraum ist ein Zylinder mit einem Durchmesser von 3 cm und einer Höhe von 10 cm. Sein Volumen beträgt 70 ccm. Auch hier gilt das Gleiche wie bei den Abbildungen 11-14; alle Werte beziehen sich auf Pendelwinkelabschnitte von je 20° .

Abbildung 15

Relative Herdraumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 15 cm Durchmesser.

Abbildung 16

Relative Herdraumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 18 cm Durchmesser.

Abbildung 17

Relative Herdraumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 21 cm Durchmesser.

Abbildung 18

Relative Herdraumdosen für Pendelwinkelabschnitte von je 20 Grad bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 24 cm Durchmesser.

Mittlere Dosis im Gesunden: Die Abbildungen 19-22 geben die mittlere Dosis im Gesunden wieder, die bei den gleichen Bedingungen wie oben auftreten, wenn die Dosis im Herd 1000 r beträgt. Ihre Berechnung erfolgte ebenfalls aus den Raumdosen der Abbildungen 11-14 nach dem oben angegebenen Verfahren. Im Gegensatz zu den 8 vorhergehenden Abbildungen beziehen sich die angegebenen Werte hier immer auf den ganzen Pendelwinkel, nicht auf einzelne Abschnitte. Diese Darstellung genügt hier; denn man wird ja, da die mittlere Dosis im Gesunden mit zunehmendem Winkel stets kleiner wird, immer danach trachten, den Pendelwinkel möglichst gross zu wählen.

Es gibt also im Hinblick auf die mittlere Dosis im Gesunden keine obere Begrenzung des Pendelwinkels.

Abbildung 19

Mittlere Dosen im Gesunden für den laufenden Pendelwinkel bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 15 cm Durchmesser.

Abbildung 20

Mittlere Dosen im Gesunden für den laufenden Pendelwinkel bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 18 cm Durchmesser.

Abbildung 21

Mittlere Dosen im Gesunden für den laufenden Pendelwinkel bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 21 cm Durchmesser.

Abbildung 22

Mittlere Dosen im Gesunden für den laufenden Pendelwinkel bei einer Dosis von 1000 r in der Pendelachse, berechnet für einen zylindrischen wasseräquivalenten Körper von 24 cm Durchmesser.

Bei den Abbildungen 19-22 sieht man, dass die mittlere Dosis im Gesunden seltsamerweise in dem Bereich zwischen 300° und 360° früher oder später, je nach dem Durchmesser des bestrahlten Körpers, wieder ansteigt. Das erklärt sich folgendermassen:

Die Berechnung der mittleren Dosis im Gesunden erfolgte nach der Formel:

$$\text{mittl. Dosis im Gesunden} = \frac{\text{Raumdosis} - \text{Herdraumdosis}}{\text{durchstrahlter Raum} - \text{Herdraum}}$$

Herdraumdosis und Herdraum sind für jede Winkelgrösse konstant. Mit zunehmendem Winkel aber wächst der durchstrahlte Raum schneller als die Raumdosis, sodass der Wert des Bruches kleiner wird: die mittlere Dosis im Gesunden sinkt mit wachsendem Pendelwinkel. Nun ist der Pendelwinkel immer bestimmt durch die Stellung des Zentralstrahls. Die Grenze des wandernden Strahlenkegels eilt aber dem Zentralstrahl immer um etwa eine halbe Hautfelddbreite voraus und erreicht die 360° Stellung einige Zeit vor ihm; bereits zu diesem Zeitpunkt ist der ganze zu bestrahlende Körper völlig ausgestrahlt, obwohl der Zentralstrahl die 360° noch gar nicht erreicht hat. Es bleibt also in dem fraglichen letzten Abschnitt die Grösse des durchstrahlten Raumes konstant, während die Raumdosis natürlich weiter wächst: der Wert des Bruches wird also wieder grösser, die mittlere Dosis im Gesunden steigt wieder an. Praktische Bedeutung kann diesem Umstand kaum zugemessen werden.

Abhängigkeit vom Durchmesser des bestrahlten Körpers:

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die Raumdosis und die relative Herdraumdosis für einige Pendelwinkel in Abhängigkeit vom Durchmesser des bestrahlten Körpers. Es sind 3 verschieden exzentrisch liegende Herde mit Abständen von 2, 4 und 6 cm von der Mittelachse des Körpers angenommen worden. Die in der Abbildung eingetragenen Grössen der Raumdosis und relativen Herdraumdosis sind den Abbildungen 11-18 entnommen.

Abbildung 23

Raumdosens in Abhängigkeit vom Durchmesser des bestrahlten zylindrischen Körpers, wenn die Dosis in der Pendelachse 1000 r beträgt. Die Pendelachse liegt dabei um 2, 4 oder 6 cm von der Mittelachse des bestrahlten Körpers entfernt. Jede der eingezeichneten Kurven gibt die Werte der Raumdosens für einen bestimmten Pendelwinkelabschnitt an.

Abbildung 24

Relative Herdraumdosens in Abhängigkeit vom Durchmesser des bestrahlten zylindrischen Körpers. Die Pendelachse liegt dabei um 2, 4 und 6 cm von der Mittelachse des bestrahlten Körpers entfernt. Jede der eingezeichneten Kurven gibt die Werte der relativen Herdraumdosens für einen bestimmten Pendelwinkelabschnitt an.

Die aufgezeichneten Kurven beziehen sich auf einzelne Abschnitte des Pendelwinkels, und zwar auf die von $340^{\circ} - 360^{\circ}$, $220^{\circ} - 240^{\circ}$ und $100^{\circ} - 120^{\circ}$. Man sieht, dass die Raumdosens bei konstant exzentrischen Herden und konstantem Pendelwinkel mit Anwachsen des Durchmessers des bestrahlten Körpers in dem Bereich bei Körperdurchmessern von 15-24 cm erheblich zunimmt, und zwar umso mehr, je grösser der Pendelwinkel gewählt wurde.

A U S W E R T U N G D E R E R G E B N I S S E

Dosisleistung:

Aus den Abbildungen 1-10 ersieht man, dass der stärkste Abfall der Dosisleistung in den Winkelbereich zwischen 100° und 180° fällt; danach verlaufen die Kurven wieder flacher. Des weiteren lässt sich erkennen, dass die Dosisleistung in der Pendelachse bei einer Winkelstellung des mittleren Fahrstrahls von 200° etwa noch 50% ihrer Grösse der Stellung bei 0° beträgt, solange die Exzentrizität des bestrahlten Herdes nicht grösser als 6 cm ist. Dabei scheint der Durchmesser des bestrahlten Körpers in bezug auf den prozentualen Abfall keine wesentliche Rolle zu spielen. Wird die Exzentrizität grösser als 6 cm, so fällt die Dosisleistung mit wachsendem Winkel stärker ab. Bei einer Exzentrizität von 8 cm z.B. fällt die Dosisleistung bei einer Winkelstellung von 200° auf etwa 40% ihres Wertes bei 0° , bei einem um 10 cm exzentrisch gelegenen Herd sogar auf etwa 35 %.

Bei Herden mit einer Exzentrizität um 8 cm liegt der Winkel, bei dem die Dosisleistung im Herdmittelpunkt etwa auf 50% ihres Wertes bei 0° sinkt, ungefähr bei 160° .

Aus dem Verlauf der Dosisleistung allein lässt sich aber über einen günstigen Pendelwinkel zu wenig sagen. Aufschlussreicher ist es schon, wenn man die Grössen der Raumdosis, relativen Herdraumdosis und mittleren Dosis im Gesunden betrachtet.

Mittlere Dosis im Gesunden:

Geht man bei der Ermittlung des günstigsten Pendelwinkels von der mittleren Dosis im Gesunden aus, (Abbildung 19-22) so sieht man, dass diese umso kleiner ist, je grösser der Pendelwinkel gewählt wird.

Die Bestrahlungsbedingungen werden also mit wachsendem Pendelwinkel günstiger, und eine obere Begrenzung ergibt sich somit aus der Grösse

der mittleren Dosis im Gesunden für den Pendelwinkel praktisch nicht.

Dagegen könnte man eventuell als absolute untere Grenze einen Pendelwinkel von 120° annehmen; unterhalb dieses Pendelwinkels beginnt die mittlere Dosis im Gesunden nämlich über 1000 r zu steigen, sie wird also höher als die im Herdzentrum selbst erreichte Dosis. Bei einem Winkel von 300° ist die mittlere Dosis im Gesunden überall unter die Hälfte der Herddosis abgesunken.

Auffallend ist noch, dass die mittlere Dosis im Gesunden, abgesehen von einem kleinen Winkelbereich unterhalb 90° , nur relativ wenig von der Exzentrizität des Herdes und dem Durchmesser des bestrahlten Körpers beeinflusst wird.

Raumdosis:

Bei Betrachtung der Raumdosis (Abbildung 11-14 und Abbildung 23) zeigt sich besonders bei Körpern mit grossem Durchmesser (Abbildung 13 und 14) ein steiler Anstieg, wenn der Herd mehr als 6 cm von der Mittelachse des Körpers entfernt ist und der Winkel zwischen der Stellung des kürzesten und längsten Fahrstrahls grösser ist als 120° . Es wäre aber sicher falsch, nur deshalb in diesen Fällen den Pendelwinkel kleiner als 240° zu wählen. Die hier angegebenen Raumdosens beziehen sich immer nur auf Winkelabschnitte von je 20° . Die endgültige Raumdosis für den ganzen Pendelwinkel wäre also der Mittelwert aus allen Raumdosens für die einzelnen Winkelabschnitte und daher weitaus niedriger als die Werte, die in dem Bereich zwischen 240° und 360° auftreten. Als Beispiel sei ein Fall herausgegriffen; in Abbildung 14 beträgt die Raumdosis für den Winkelabschnitt von 340° bis 360° bei einer Exzentrizität des Herdes von 6 cm ca. 7200 rl. Die tatsächliche Raumdosis aber, die man erhalten würde, wenn man mit einem Pendelwinkel von 360° bestrahlt, beträgt nur etwa 3000 rl. Diese Art der Ausdeutung der Kurve ist aber nur dann zutreffend, wenn man eine obere Grenze der Raumdosis nicht überschreiten will.

Es scheint also nicht angebracht, allein durch das Auftreten einer grösser-

ren Raumdosis den Pendelwinkel kleiner zu wählen. Man könnte es nur als allgemeine und ganz grobe Richtlinie gelten lassen, dass man im Zweifelsfall bei sehr exzentrischen Herden und grossem Durchmesser des zu bestrahlenden Körpers durch die Wahl des kleineren Pendelwinkels an Raumdosis einspart.

Relative Herdraumdosis:

Durch die Raumdosen und die mittleren Dosen im Gesunden ergab sich also keine eindeutige obere Begrenzung des Pendelwinkels. Dafür ergeben die Kurven der relativen Herdraumdosis (Abbildung 15-18 und Abbildung 24) ein ziemlich klares Bild: Man sieht je nach Grösse des Durchmessers des bestrahlten Körpers und der Exzentrizität des Herdes einen mehr oder weniger starken Abfall der relativen Herdraumdosis. Da diese ein beachtliches Kriterium für die Zweckmässigkeit einer Bestrahlung darstellt, soll auf sie besonders eingegangen werden. (12)

Bei jeder Form der Pendelbestrahlung stösst man auf die Schwierigkeit der exakten Definition des Herdraumes. Auch bei den hier durchgeführten Berechnungen, bei denen klinische Gegebenheiten keine Rolle spielen, ergibt sich ein ähnliches Problem.

Zwar ist der Herdraum bei den hier ausgeführten Berechnungen immer von vornherein als Zylinder mit 70 ccm Rauminhalt definiert, aber sein Grössenverhältnis zu dem Volumen des gesamten bestrahlten Phantomkörpers ist nicht konstant. So ist bei dem Phantom mit einem Durchmesser von

15	18	21	24 cm
----	----	----	-------

und einem Volumen von

2125	3025	4160	5425 ccm
------	------	------	----------

das Verhältnis zwischen dem Rauminhalt des Herdraumes und dem des gesamten Phantomkörpers etwa

1 : 30	1 : 43	1 : 60	1 : 78
--------	--------	--------	--------

Es ergeben sich also bei Annahme eines relativ grösseren Herdraumes

scheinbar günstigere Bestrahlungsbedingungen als bei Annahme eines relativ kleineren Herdraumes.

Die Verhältnisse sind jedoch meist viel komplizierter als bei diesem einfachen Beispiel, vor allem auch deshalb, weil die Dosis innerhalb des Herdraums nicht konstant ist. Man muss sich also hüten, die relativen Herdraumdosen einfach mit ihren zahlenmässigen Werten zu vergleichen. Es wäre daher auch falsch zu sagen: die relative Herdraumdosis ist als ungünstig zu bezeichnen, wenn sie unter eine bestimmte Grösse absinkt.

Wie aber kann man dann überhaupt einen Vergleich anstellen?

Der durch die verschiedenen grossen Herdräume auftretende Fehler lässt sich vermeiden, wenn man nicht die absoluten Werte, sondern den Abfall der relativen Herdraumdosis vom Ausgangswert bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls vergleicht.

Zur besseren Erklärung seien zwei willkürlich angenommene abstrakte Beispiele angeführt:

Bei einem bestimmten Pendelwinkel fällt bei Beispiel A die relative Herdraumdosis von 20 % bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls auf 10 % bei Einstellung des längsten Fahrstrahls.

Im Falle B sinkt die relative Herdraumdosis von 12% auf 8 %.

Fall B zeigt bezüglich der relativen Herdraumdosis die günstigeren Verhältnisse, obwohl die relative Herdraumdosis bei äusserster Winkelstellung des Zentralstrahls kleiner ist als bei A: massgebend ist der Abfall vom Ausgangswert, und der beträgt bei A die Hälfte, bei B aber nur ein Drittel.

Wendet man diese Überlegung für die Wahl des Pendelwinkels an, so müsste dieser so gewählt werden, dass auch bei äusserster Winkelstellung die relative Herdraumdosis nicht unter einen bestimmten Bruchteil ihres Wertes bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls absinkt.

Die Schwierigkeit liegt nun noch darin, festzulegen, wie gross dieser Bruchteil sein soll.

Um wenigstens einen groben Überblick und einen gewissen Anhalt zu geben, wurden in den Abbildungen 25-28 die Grössen der Pendelwinkel eingezeichnet, bei denen im Bereich des längsten Fahrstrahls die rela-

tive Herdraumdosis noch die Hälfte, ein Drittel, ein Viertel und ein Fünftel ihrer Grösse bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls beträgt.

Die Kurven gelten von oben nach unten für Durchmesser des bestrahlten Körpers von 24, 21, 18 und 15 cm. Die Werte der relativen Herdraumdosis beziehen sich wie bei den Abbildungen 15-18 auf Abschnitte des Pendelwinkels von je 20° , nicht auf den ganzen Pendelwinkel.

Abbildung 25

Die Kurven zeigen den Abschnitt des Pendelwinkels an, bei dem bei einer bestimmten Exzentrizität des Herdes die relative Herdraumdosis auf die Hälfte ihres Wertes abfällt, den sie bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls erreicht.

Abbildung 26

Die Kurven zeigen den Abschnitt des Pendelwinkels an, bei dem bei einer bestimmten Exzentrizität des Herdes die relative Herdraumdosis auf ein Drittel ihres Wertes abfällt, den sie bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls erreicht.

Abbildung 27

Die Kurven zeigen den Abschnitt des Pendelwinkels an, bei dem bei einer bestimmten Exzentrizität des Herdes die relative Herdraumdosis auf ein Viertel ihres Wertes abfällt, den sie bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls erreicht.

Abbildung 28

Die Kurven zeigen den Abschnitt des Pendelwinkels an, bei dem bei einer bestimmten Exzentrizität des Herdes die relative Herdraumdosis auf ein Fünftel ihres Wertes abfällt, den sie bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls erreicht.

Aus den Kurven sieht man, dass der Durchmesser des verwendeten Körpers bei nur wenig exzentrischen Herden auf den Verlauf der relativen Herdraumdosis keinen sehr grossen Einfluss ausübt. Andererseits zeigt der Verlauf der Kurven bei Exzentrizitäten von mehr als 6 cm keine Änderung des Pendelwinkels; das bedeutet, dass dann der prozentuale Abfall der relativen Herdraumdosis gleich bleibt, auch wenn die Exzentrizität des Herdes grösser wird.

Für die praktische Anwendung wären die Abbildungen 25-28 so zu verstehen; will man z.B. bei einem Körper mit einem Durchmesser von 21 cm einen um 5 cm exzentrisch liegenden Herd bestrahlen, und soll z.B. die relative Herdraumdosis bei Einstellung des längsten Fahrstrahls nicht unter ein Viertel ihres Wertes beim kürzesten Fahrstrahl absinken, so sucht man (in Abbildung 27) die zweite Kurve von oben (für den Durchmesser von 21 cm) und liest unter der Exzentrizität = 5 cm den entsprechenden Winkel ab. Er wäre in diesem Fall etwa 280° . Bei diesem Winkel also ist die relative Herdraumdosis auf ein Viertel ihres ursprünglichen Wertes gesunken.

Bei anderen Bedingungen wäre ganz analog zu verfahren. Zwischen den eingetragenen Kurven liegende Werte sind durch Interpolation leicht zu finden.

Die Abbildungen 25-28 beanspruchen keineswegs, Richtlinien für die Wahl des Pendelwinkels zu sein. Sie sollen vielmehr einen Anhalt geben, wie man die Grösse des zu verwendenden Pendelwinkels beurteilen und nach welchen Gesichtspunkten man einen günstigen Winkel ermitteln kann. Wie gross der Abfall der relativen Herdraumdosis sein darf, kann für den Einzelfall auch keineswegs hier festgelegt werden, sondern muss sich aus der jeweils gerade auftretenden Situation ergeben.

Ganz allgemein lässt sich aus den Abbildungen 25-28 noch sagen: auch wenn man die relative Herdraumdosis nicht unter 50% ihres Wertes beim kürzesten Fahrstrahl absinken lassen will (also bei einer sehr einschränkenden Bedingung!), kann man, selbst wenn der Herd 8 und 10 cm exzentrisch liegt, ziemlich unabhängig vom Durchmesser des

bestrahlten Körpers einen Pendelwinkel von mindestens 180° wählen; hält man einen Abfall der relativen Herdraumdosis auf ein Drittel oder einen noch kleineren Bruchteil für tragbar, wird der Pendelwinkel grösser.

WINKELSTELLUNG DER RÖHRE →

140 %
120 %
100 %
80 %
60 %
40 %
20 %

↓
% DES RÖNTGENWERTES →

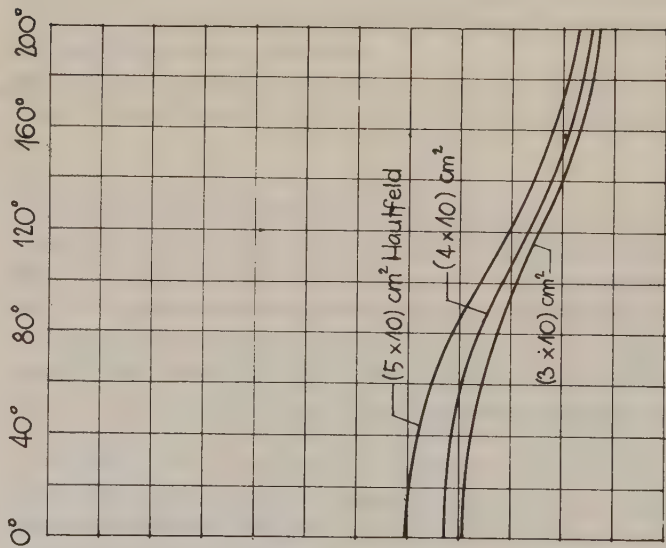


ABB. 1

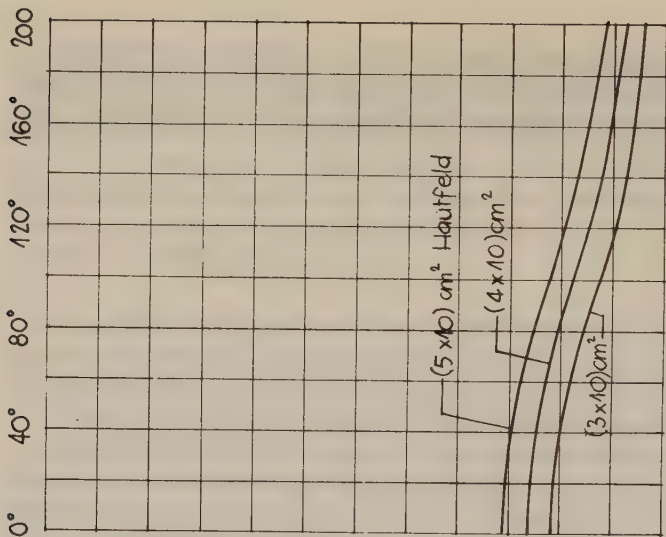


ABB. 2

WINKELSTELLUNG DER RÖHRE →

140 %
120 %
100 %
80 %
60 %
40 %
20 %

↑ % DES RÖNTGENWERTES

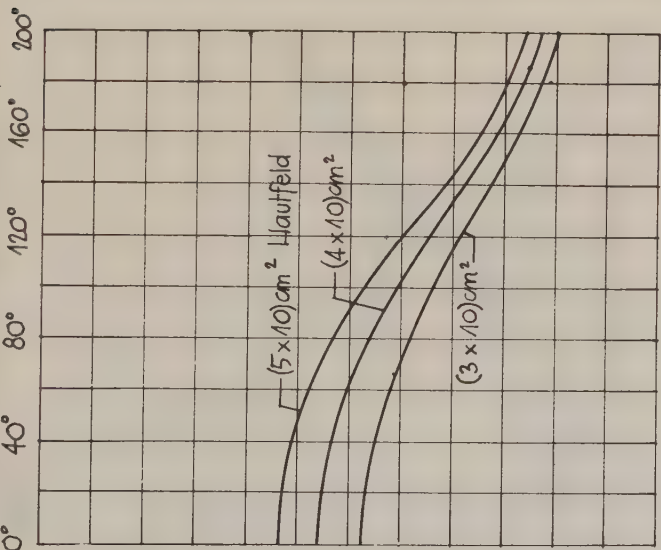


ABB. 3

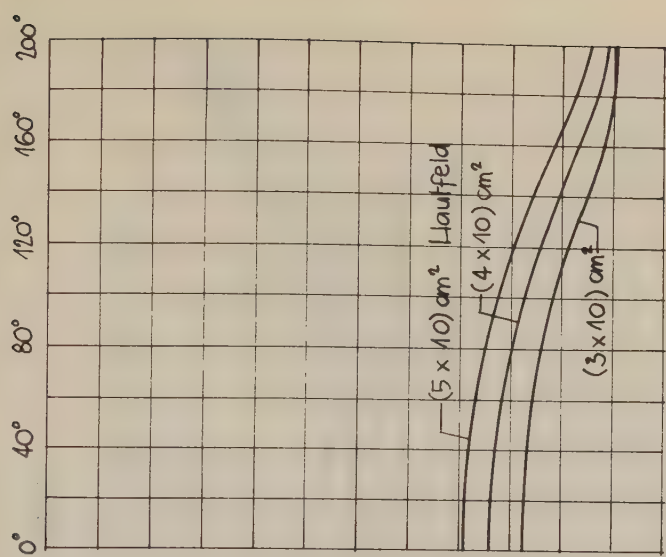


ABB. 4

WINKELSTELLUNG DER RÖHRE →

0° 40° 80° 120° 160° 200°

140 %
120 %
100 %
80 %
60 %
40 %
20 %

← % DES RÖNTGENWERTES

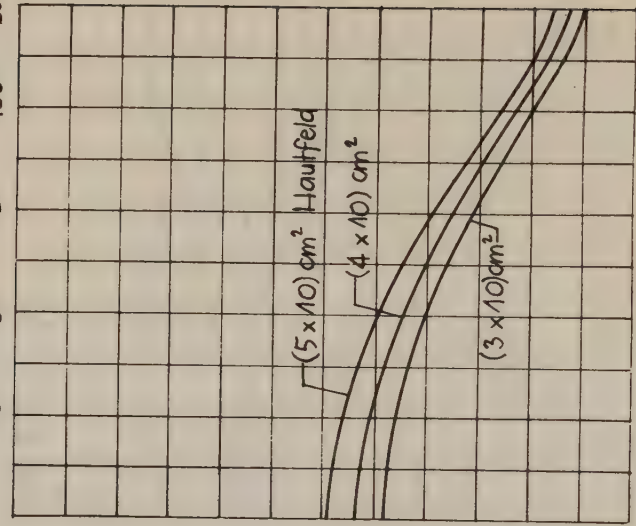
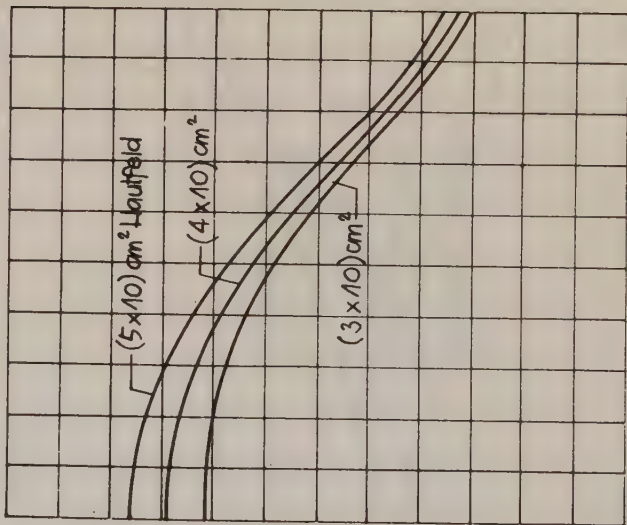


ABB. 5

ABB. 6

WINKELSTELLUNG DER RÖHRE →

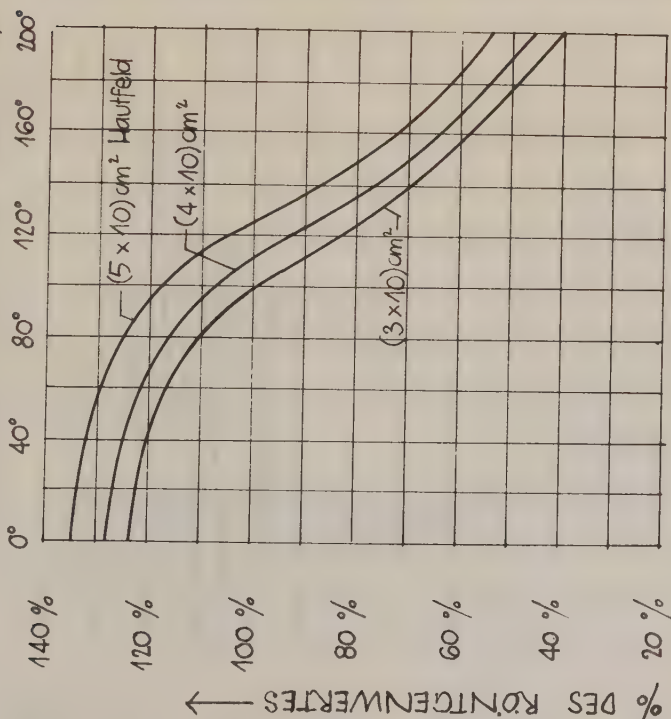


ABB. 7

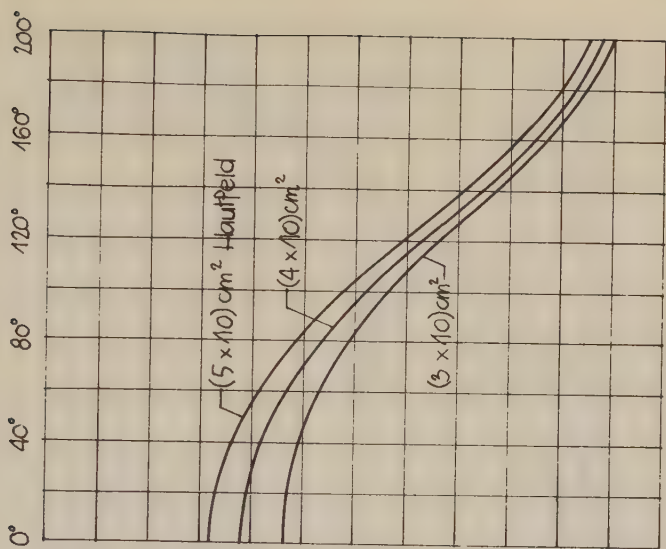


ABB. 8

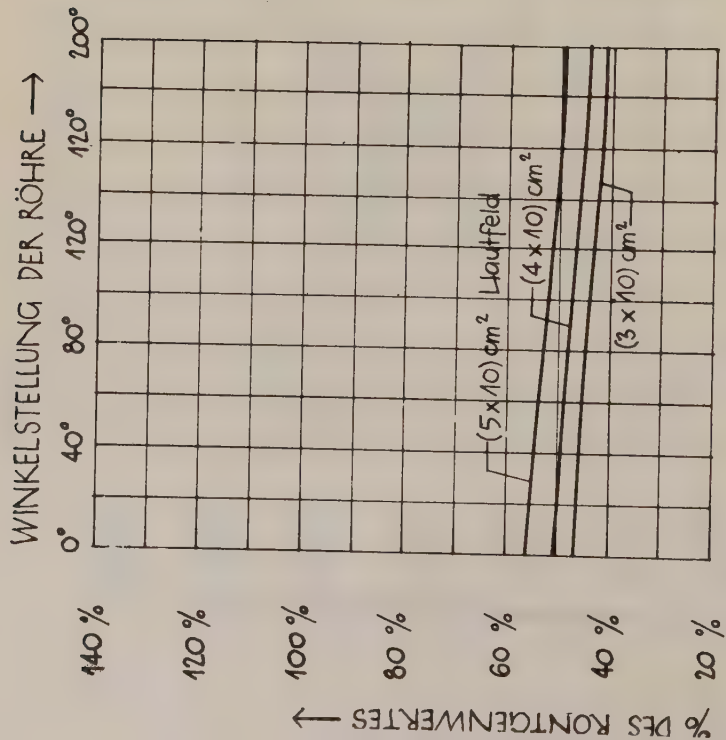


ABB. 9

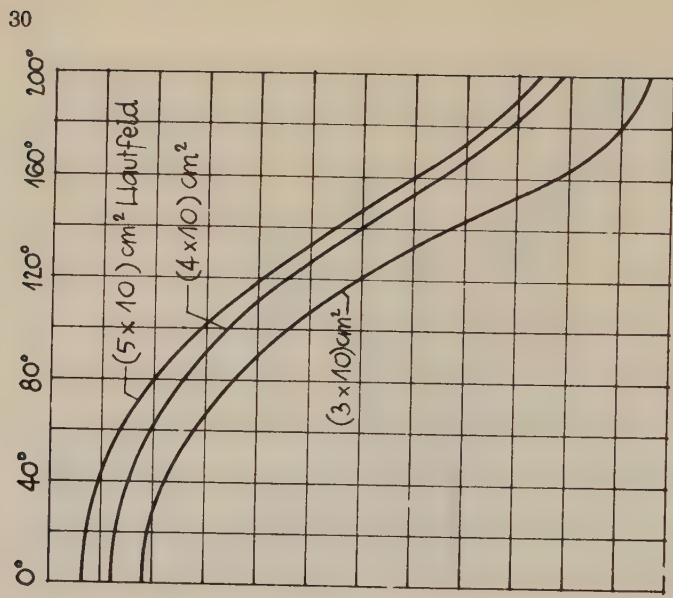


ABB. 10

PENDELWINKELABSCHNITT →

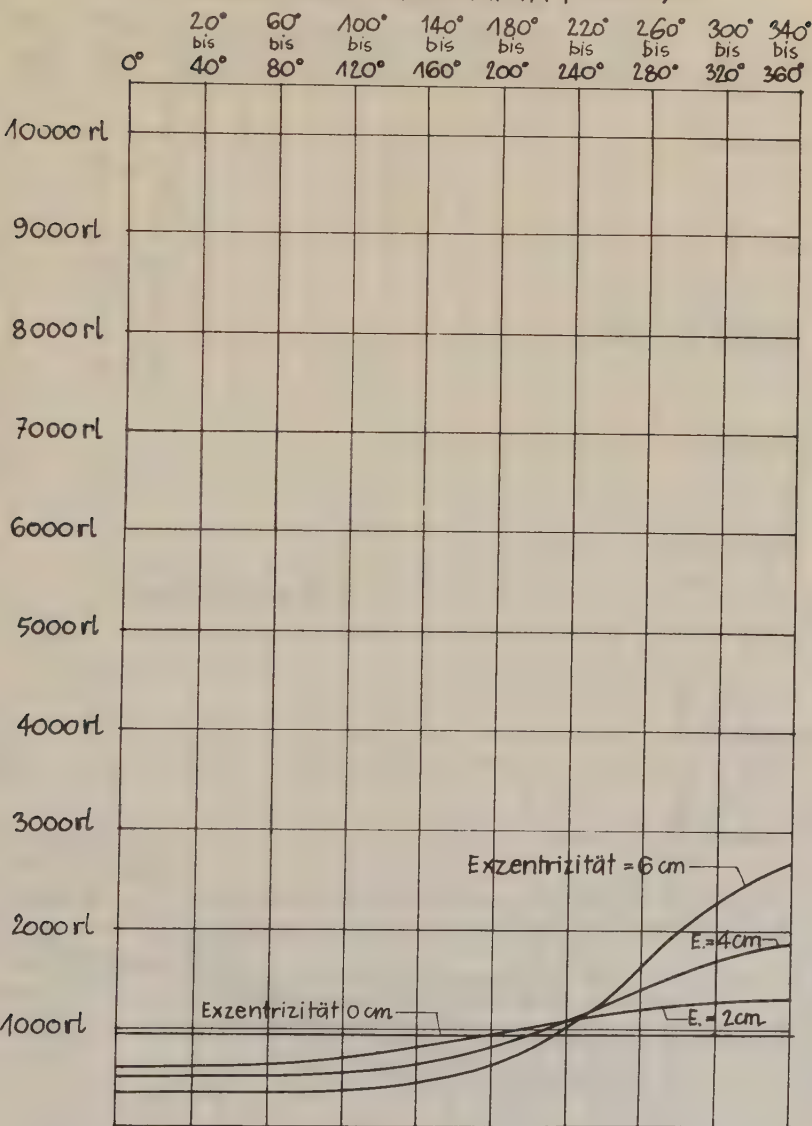


ABB. 11

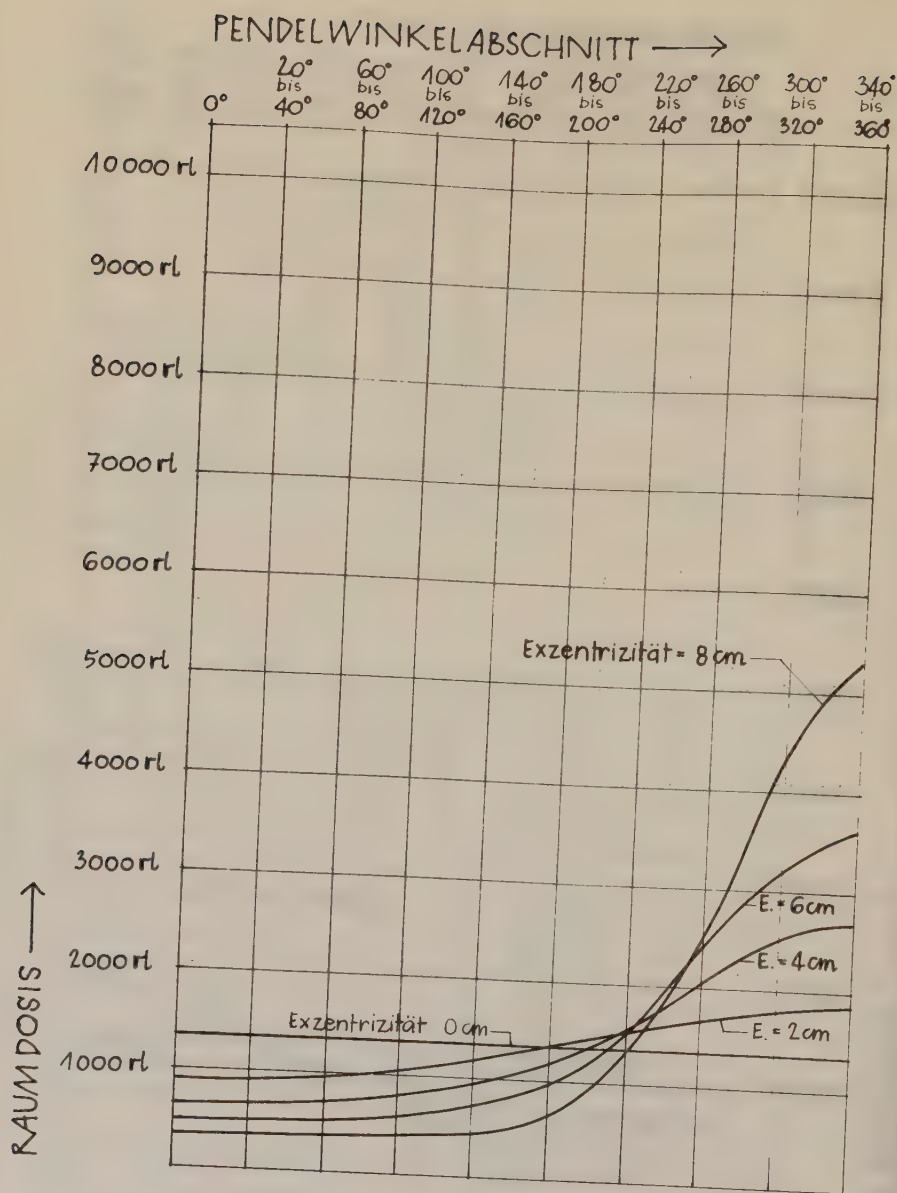


ABB. 12

PENDELWINKELABSCHNITT →

	20°	60°	100°	140°	180°	220°	260°	300°	340°
	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis	bis
0°	40°	80°	120°	160°	200°	240°	280°	320°	360°

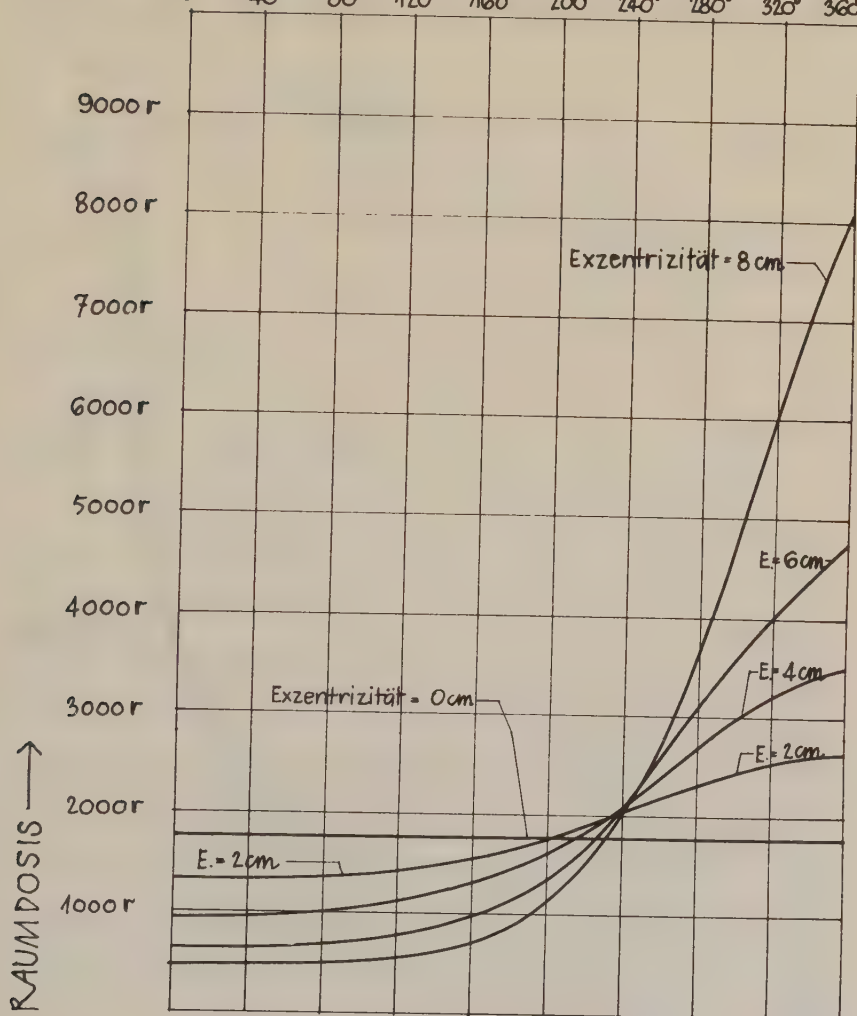


ABB. 13

PENDELWINKELABSCHNITT →

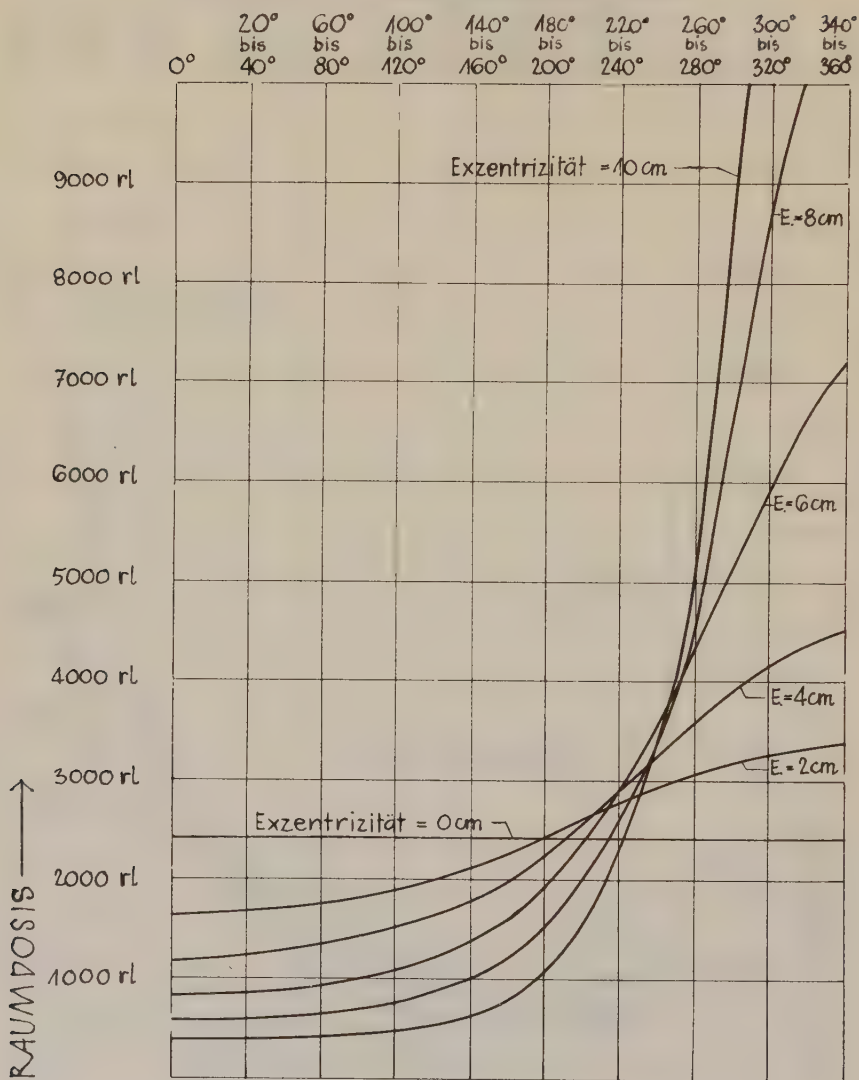


ABB. 14

PENDELWINKELABSCHNITT →

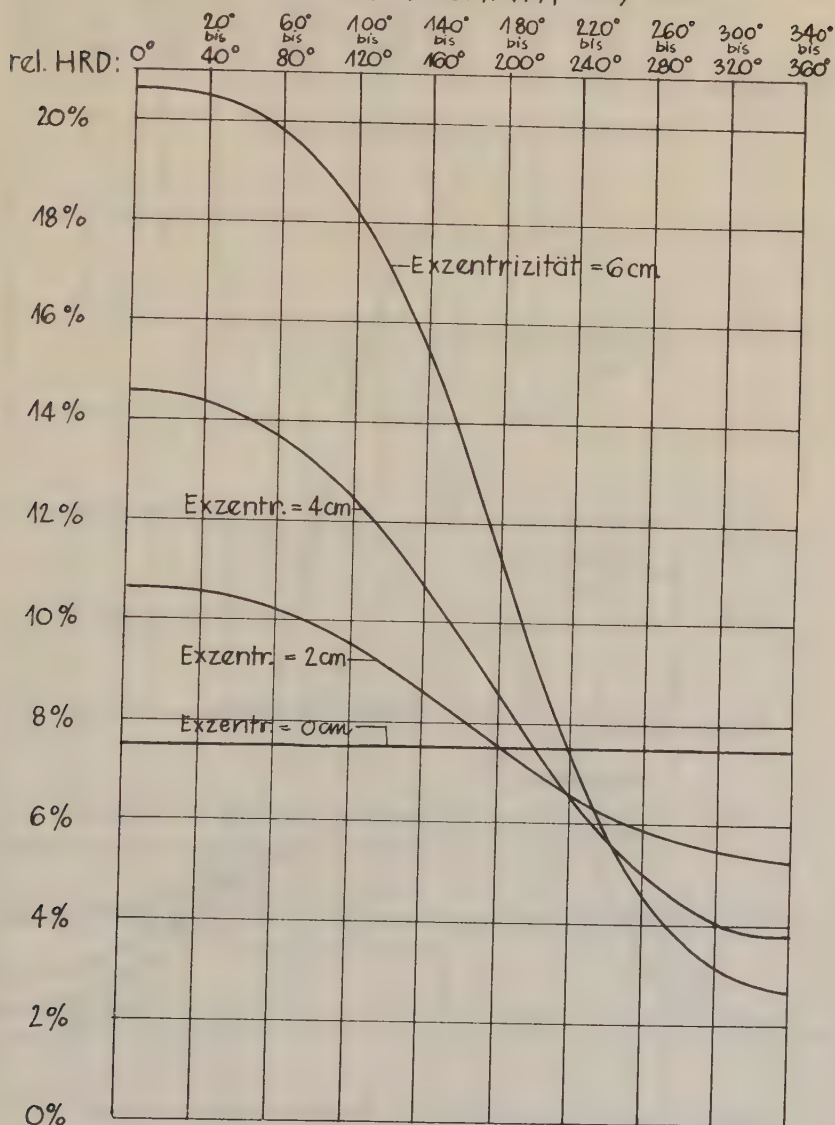


ABB. 15

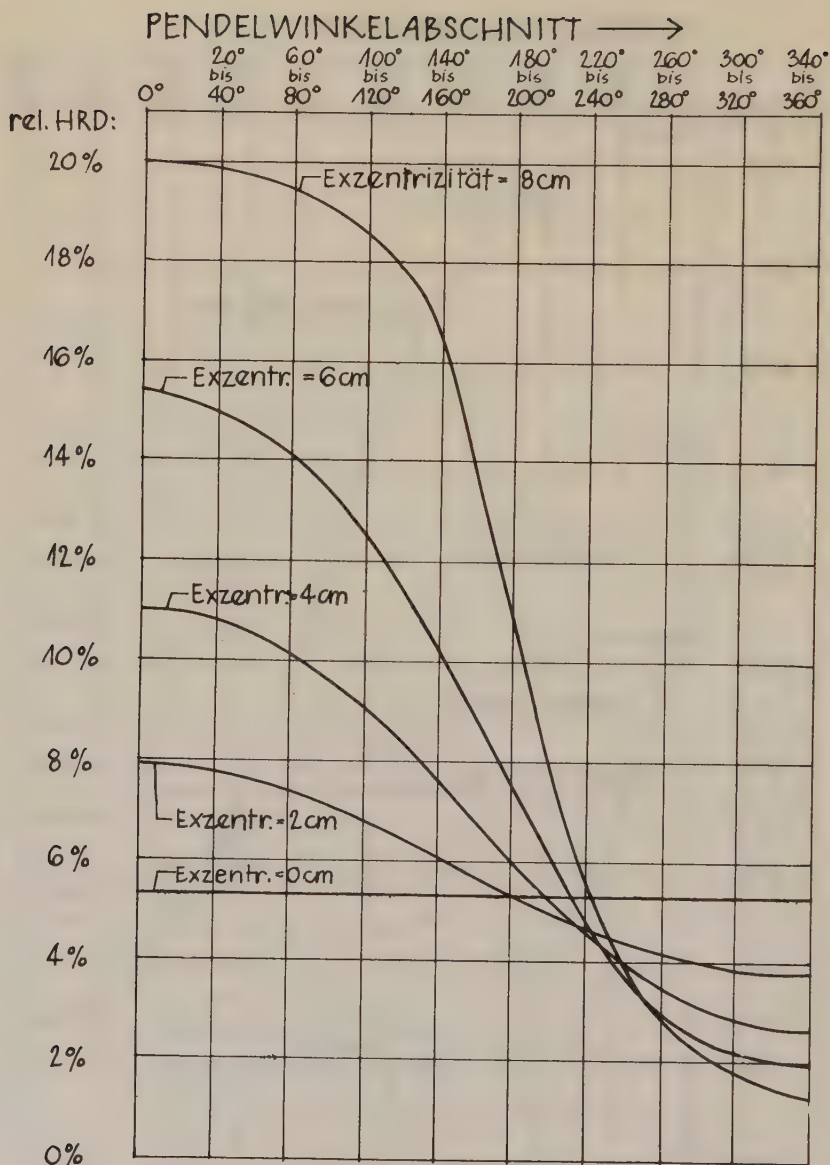


ABB. 16

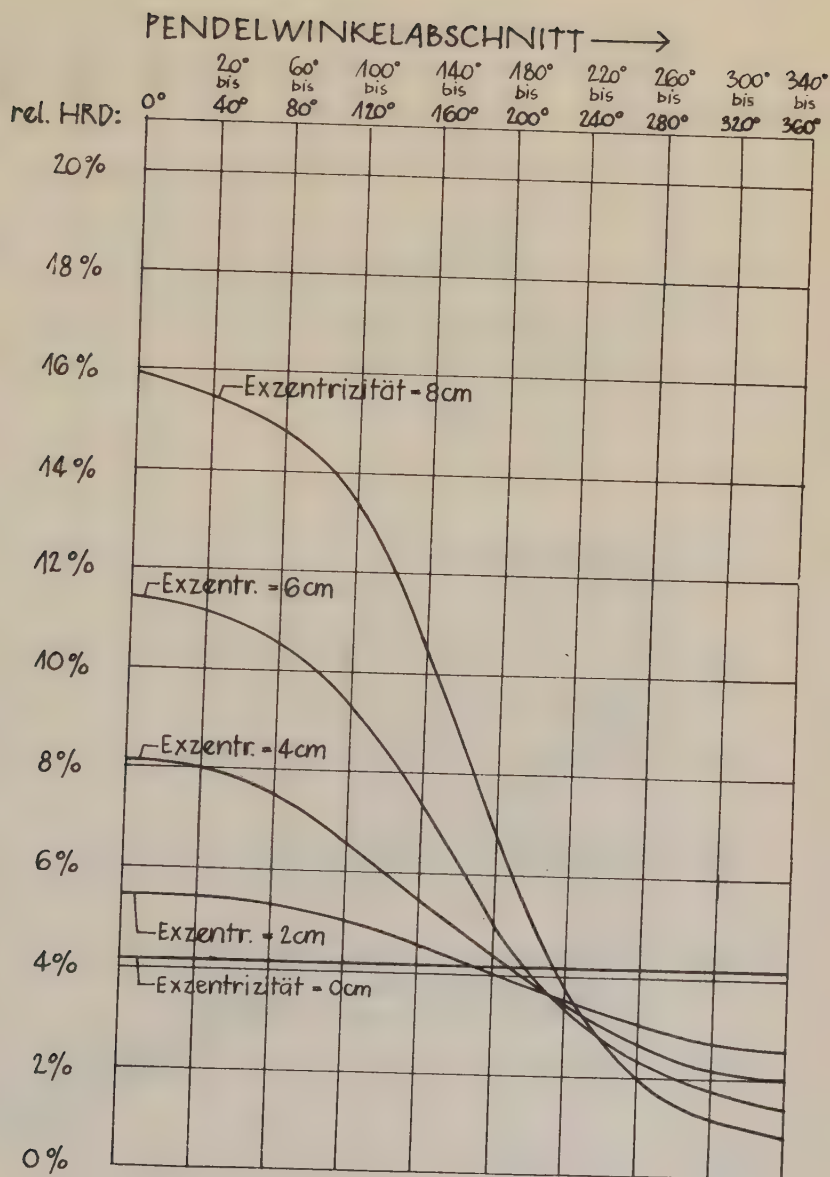


ABB. 17

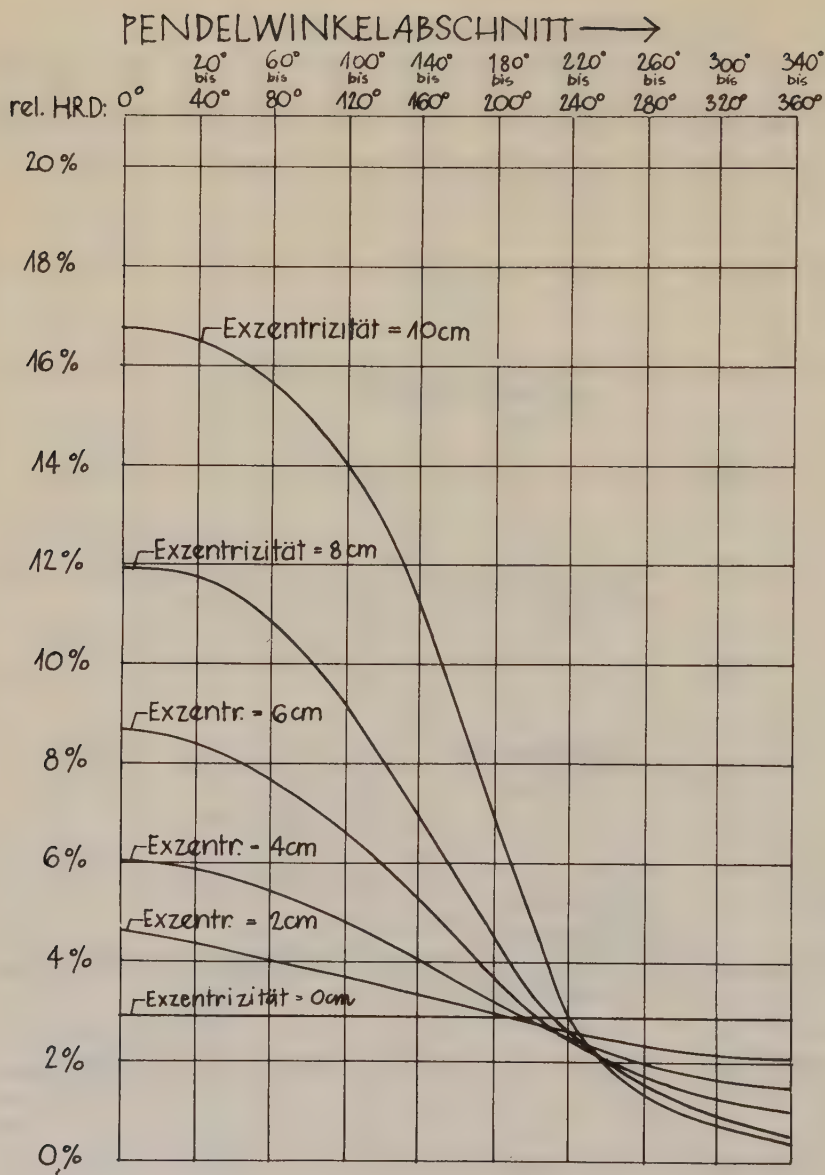


ABB. 18

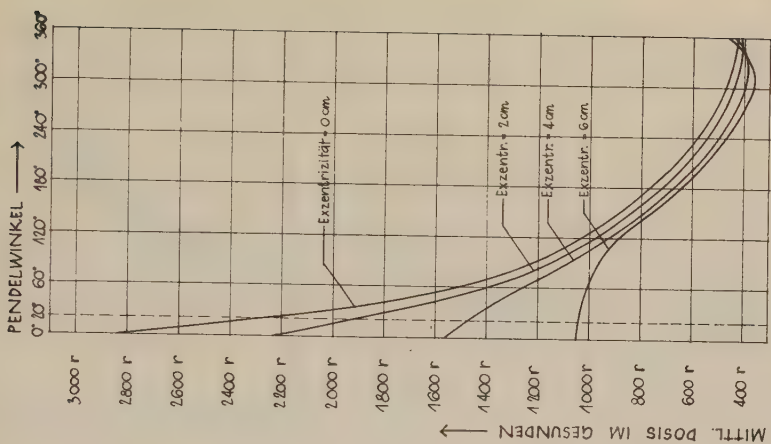


Abb. 19

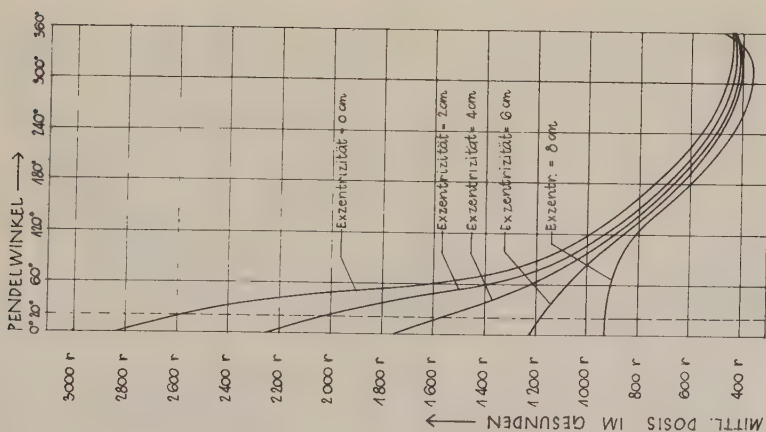


Abb. 20

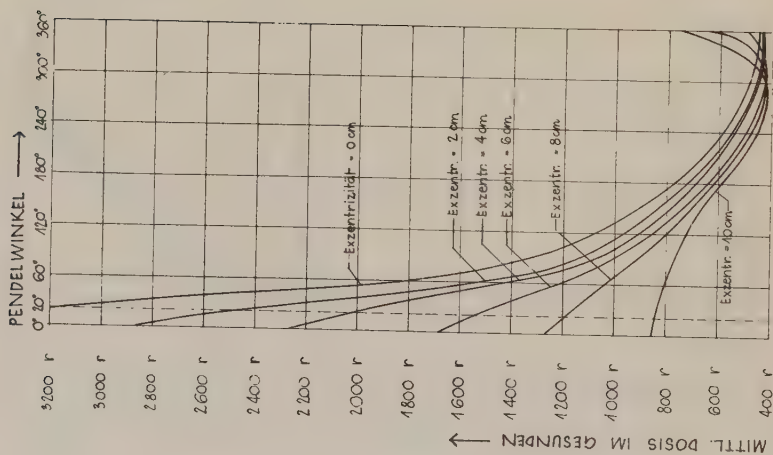


Abb. 22

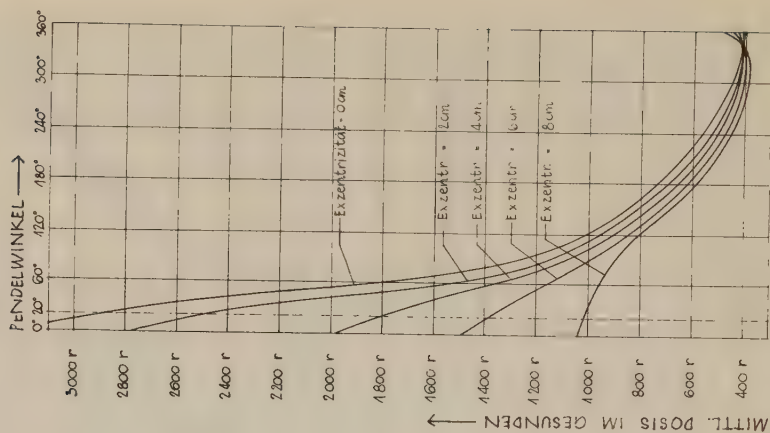


Abb. 24

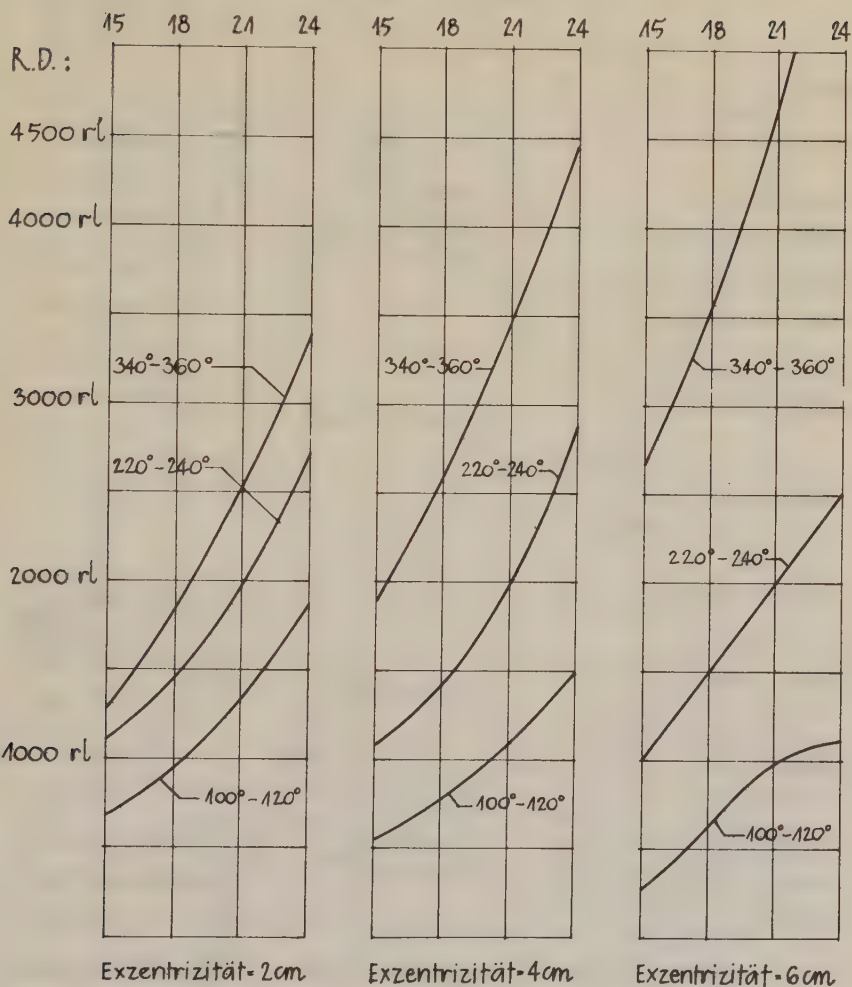
PHANTOMDURCHMESSER IN cm: $\longrightarrow$ 

ABB. 23

PLANTOMDURCHMESSER IN cm : $\longrightarrow$

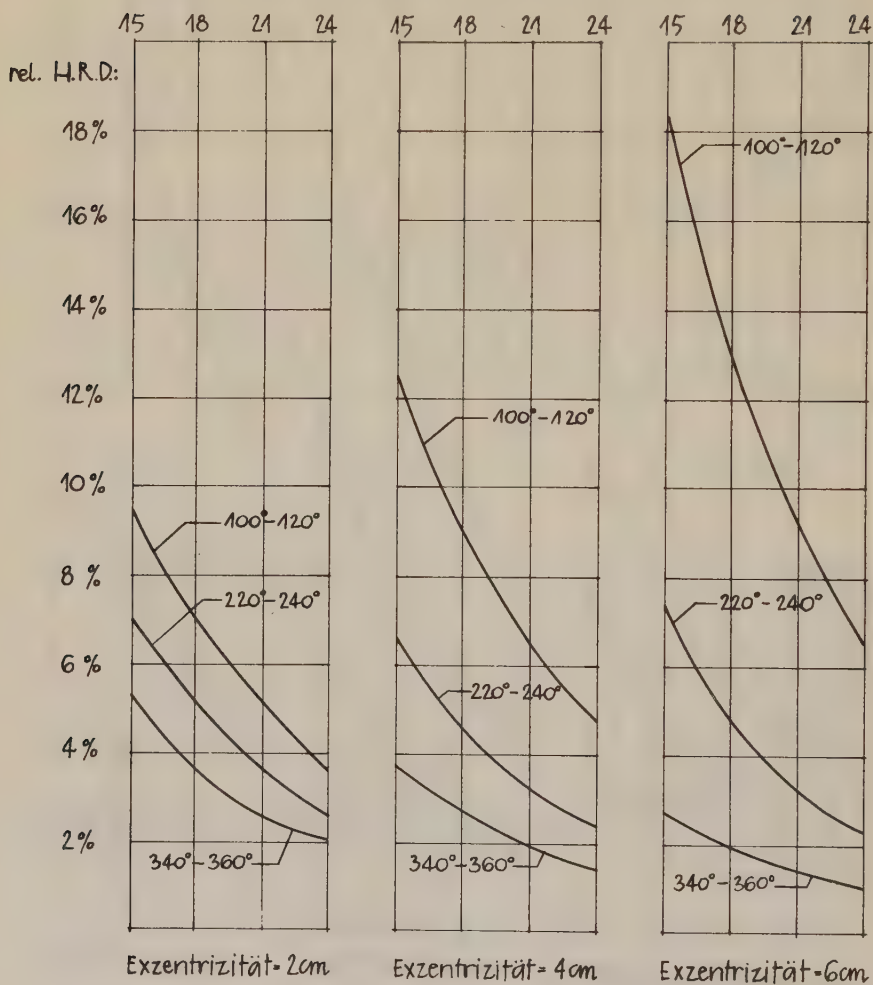


ABB. 24

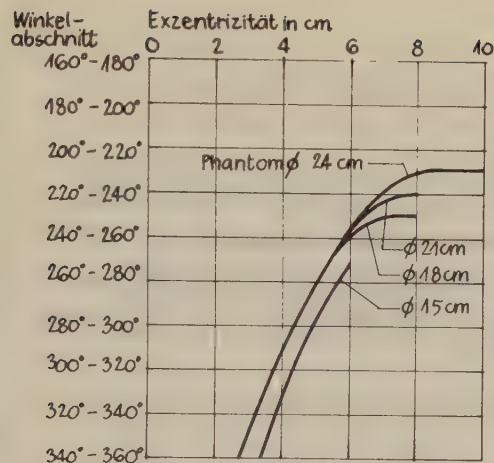


ABB. 25

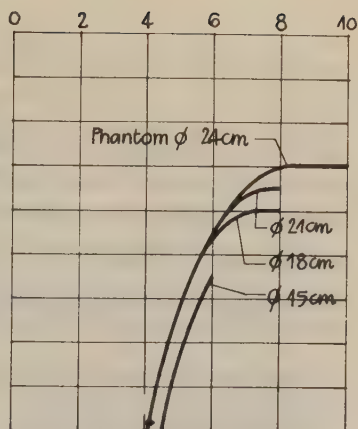


ABB. 26

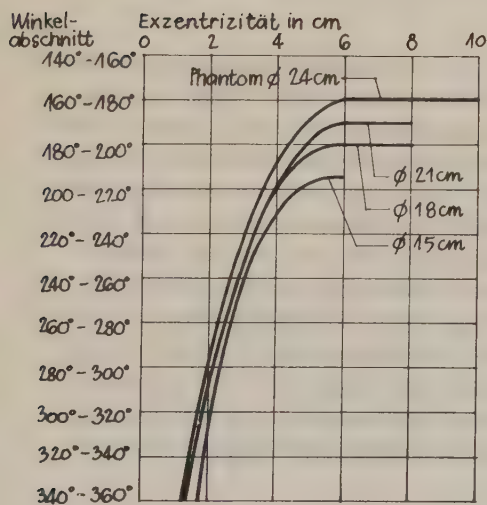


ABB. 27

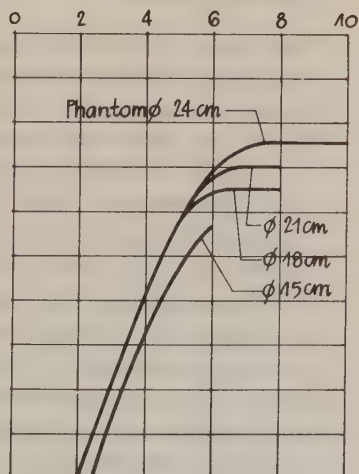


ABB. 28

Z U S A M M E N F A S S U N G

Die Arbeit befasst sich mit der Frage, wie gross der Pendelwinkel bei exzentrisch liegenden Herden gewählt werden soll, um bei einer Pendelbestrahlung kreisrunder und ovaler Körper optimale Bedingungen zu erzielen.

Als Kriterien zur Beurteilung dieser Frage wurden die Änderung des Dosiszuflusses am Herd, die Raumdosis, die relative Herdraumdosis und die mittlere Dosis im Gesunden herangezogen.

An Hand von Messungen am Phantom und von Berechnungen kommt die Arbeit zu folgendem Ergebnis:

1. Bei der Verwendung eines Pendelwinkels unter 90° ist die mittlere Dosis im Gesunden mindestens so gross wie die Dosis am Herd, sobald dieser mehr als 2 cm exzentrisch liegt. Ist der Pendelwinkel grösser als 120° , so ist die mittlere Dosis im Gesunden fast immer kleiner als die Dosis am Herd. Der Durchmesser des bestrahlten Körpers spielt dabei in einem Bereich zwischen 15 und 24 cm keine wesentliche Rolle (Abbildung 19-22).
2. Geht man von der Bedingung aus, dass die relative Herdraumdosis bei Einstrahlung über den längsten Fahrstrahl auf nicht weniger als die Hälfte ihres Wertes bei Einstrahlung über den kürzesten Fahrstrahl abfallen soll, so darf der Längenunterschied der beiden extremen Fahrstrahlen nicht mehr als eine Gewebs-Halbwert-Tiefe der verwendeten Strahlenqualität betragen. Diese Differenz zwischen kürzestem und längstem Fahrstrahl beträgt bei einer Strahlenqualität um 1 mm Cu Halbwertschicht etwa 5 cm und ist nahezu unabhängig vom Durchmesser des bestrahlten Körpers. Die Abhängigkeit der Fahrstrahldifferenz von der Exzentrizität des bestrahlten Herdes ist nur gering und berechnet sich nur nach Millimetern; bei Herden, die weniger als 3 cm exzentrisch liegen, ist die Differenz zwischen kürzestem und längstem Fahrstrahl am kleinsten und liegt für eine Strahlenqualität um 1 mm Cu Halbwertschicht etwa bei 4,5 cm.

Ganz allgemein lässt sich also sagen:

Will man die relative Herdraumdosis und die mittlere Dosis im Gesunden als wichtigste Kriterien für die Pendelbestrahlung gelten lassen, so kann man für die Grösse des Pendelwinkels eine obere und eine untere Begrenzung festlegen.

- a) Pendelwinkel unter 90° sind unzweckmässig, weil bei so kleinen Pendelwinkeln die mittlere Dosis im Gesunden grösser ist als die Dosis in der Pendelachse.
Eine Ausnahme davon bilden auf die Körperoberfläche beschränkte Herde.
- b) Man sollte den Pendelwinkel so gross wählen, dass die Differenz zwischen kürzestem und längstem Fahrstrahl nicht grösser ist als eine Gewebshalbwert-Tiefe der verwendeten Strahlenqualität.
Die relative Herdraumdosis fällt dann nicht unter die Hälfte ihres Wertes bei Einstellung des kürzesten Fahrstrahls ab.

L I T E R A T U R

1. Barth-Wachsmann Die Bewegungsbestrahlung
2. Brandl Strahlenther. 87, 224-228 (1952)
3. Bender u. Kohler Strahlenther. 72, 289 (1943)
4. Glasser, Quimby, Physical Foundation of Radiology
Taylor, Weatherwax RB. Hoeber, Inc. New York
5. Kohler Der heutige Stand der Pendelbestrahlung
 tiefliegender Krebse
 Sonderabdruck Zentralblatt Chirurgie
 Nr. 6 (1940)
6. Kohler Monatsschrift Krebsbekämpfung 5 (1939)
7. Keller Fortschr. Röntgenstr., 84, 73-77 (1956)
8. Kuttig Strahlenther. 102/4, 613-616 (1957)
9. Maurer Acta radiologica
 (Stockholm) 44, 257-264 (1955)
10. Nakaidzumi u. Strahlenther. 66, 583 (1939)
Miyakawa
11. Nielsen Universitat. forlaget Aarhus (1948)
12. Wachsmann Strahlenther. 93, 295-298 (1954)

L E B E N S L A U F

Am 30.9.1951 wurde ich in Gablonz an der Neisse, als Sohn des Arztes und Zahnarztes Dr.med.Werner Stark geboren.

Nach dem Besuch der vier ersten Klassen der dortigen Volksschule trat ich 1942 in die dortige Oberschule ein. Nach dem Zusammenbruch des Dritten Reiches im Mai 1945 drangen tschechische Horden in die Stadt ein.

Im Juni 1945 wurde mein Jahrgang zusammen mit vielen anderen deutschen Jugendlichen von tschechischer Soldateska in das Arbeits- und Hungerlager Sobottka verschleppt. Nachdem es mir schliesslich gelungen war, aus dem Lager zu entkommen, wurde meine ganze Familie im Herbst des gleichen Jahres von den Tschechen nach Bayern ausgesiedelt. Wir kamen über das Flüchtlingslager Furth im Walde nach Buchloe im Allgäu, von wo ich die Oberrealschule in Kaufbeuren besuchen konnte. Im Jahre 1951 legte ich dort das Abitur ab.

Noch im gleichen Jahr begann ich das Studium der Medizin an der Universität in München. 1954 absolvierte ich dort die Ärztliche Vorprüfung, 1957 konnte ich am 6. Juni mein Medizinisches Studium mit dem Staatsexamen abschliessen.

